Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 14, No. 2, 2024, p. 147-161

Design, Construction, and Optimization of Performance of Electrodynamic Spraying Head of Atomizer Motorized Knapsack Sprayer

M. Rezaei[1], J. Khodaei[1*], B. Astinchap[2]

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
2- Department of Physics, Faculty of Science, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: j.khodaei@uok.ac.ir)

Received: 01 December 2022
Revised: 01 February 2023
Accepted: 27 February 2023
Available Online: 27 February 2023

How to cite this article:
Rezaei, M., Khodaei, J., & Astinchap, B. (2024). Design, Construction, and Optimization of Performance of Electrodynamic Spraying Head of Atomizer Motorized Knapsack Sprayer. *Journal of Agricultural Machinery*, *14*(2), 147-161. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.79865.1134

Introduction

Due to the increasing need for agricultural products, protection of products against pathogens and preventing them from being wasted is important. Studies on droplet charging systems result in the reduction of chemical usage and an increase in the deposition of droplets on the target. Conventional sprayers used in Iran have numerous disadvantages such as drift, environmental pollution, lack of complete and homogeneous coverage of the spraying surface, phytotoxicity, and crop losses. Therefore, evaluation of new spraying methods and using a variety of electrical sprayers as alternatives to conventional spraying is essential. This study aims to design, construct, and optimize the performance of the electrodynamic head of an atomizer motorized knapsack sprayer, and study the effects of the angle of the target position, spraying distance, and wind speed on the performance of the electrodynamic sprayer.

Materials and Methods

Experiments were performed in an agricultural machinery workshop at The Department of Biosystems Engineering, the University of Kurdistan, Iran, with an atomizer motorized knapsack sprayer equipped with an electrodynamic head. The effect of some factors including wind speed, spraying angle, and spraying distance on deposition, coverage percentage, and uniformity of spraying were investigated. These effects were investigated to determine the uniformity coefficient of total spraying. Design Expert 8.0.6 Trial software was used to design the experiments based on central composite design and to analyze the data. The investigated factors and levels were: the distance of nozzles from the target (at three levels of 2, 4, and 6 m), the angle of the target position (at three levels of 0, 45, and 90 degrees), and wind speed (at three levels of 2.5, 3, and 3.5 m s^{-1}). Water-sensitive paper cards were used to evaluate the quality of the spraying. The cards were scanned and magnified with an Olympus SZX12 Stereo Microscope equipped with an objective lens of X1 and a total magnification of 7X. The characteristics of droplet size were determined using Mountains Map Trial and Deposit Scan software.

Results and Discussion

The maximum value of the total spraying uniformity coefficient was equal to 1.95 for the spraying angle of 0 degrees, the distance of 6 meters, and the speed of 3.5 meters per second. Meanwhile, the lowest value of the spray uniformity coefficient of 1.18 was obtained for the test conditions of 90 degrees, distance of 2 m, and speed of 2.5 m s^{-1}, respectively. Based on analysis of variance for the two-factor interactions model (P-value less than 0.0001, explanation coefficient 0.9383, absolute explanation coefficient 0.910, standard deviation 0.0590, and coefficient of variation 3.790%). It can be stated that this model is highly accurate in predicting the uniformity of the total spraying, and the linear components of spraying angle and spraying distance, as well as the interaction of spraying angle × spraying distance and spraying distance × wind speed, significantly affect the uniformity of the total spraying ($p<0.05$). Nevertheless, the linear component of wind speed and the interaction

https://doi.org/10.22067/jam.2023.79865.1134

between wind speed and spraying angle had no significant effect on the changes in the uniformity coefficient of the total spray. According to the variance analysis table (F-values), spraying distance has a far greater effect on the spraying uniformity coefficient than the spraying angle.

It has been observed that the spraying uniformity coefficient will increase by increasing the spraying distance and decreasing the spraying angle. It can also be stated that the linear components of spraying angle and spraying distance, the interaction component of spraying angle × spraying distance, and the square power of the components of spraying distance and wind speed have a significant effect on surface coverage. The values of R^2, Adj-R^2, CV, and PRESS for the model adapted to the test data of leaf surface coverage percentage were obtained as 0.9929, 0.9865, 4.87%, and 188.61, respectively.

Among the three input variables, the spraying distance has the greatest effect on the coverage of water-sensitive papers. At larger spraying angles, especially 90 degrees, the coverage decreased with the increasing distance. At spray angle of 90 degrees, by increasing the distance from 2 to 4 m, the spray uniformity coefficient increased from 1.18 at a wind speed of 2.5 m s^{-1} to 1.84 at a wind speed of 3.5 m s^{-1}. However, at smaller spraying angles (for example zero-degree angle), at first, the spraying coverage increases with the increase of the spraying distance from 2 to 3 m and then sharply decreases afterward. According to the contours of spray coverage, in the spray distance range of 4 to 6 m and regardless of wind speed, the spray coverage does not vary with the increase of the spraying angle ($p< 0.05$). Meanwhile, in the spray distance range of 2 to 4 m, with the increase of the spraying angle, the spraying coverage increases significantly ($p<0.05$). Overall, increasing the distance between the sprayer and the target decreased the surface coverage on the target, and in electrodynamic spraying, the uniformity of particle deposition on the underside of the target was relatively the same as on the upper side.

Conclusion

To improve the performance of the atomizer motorized knapsack sprayer, an electrodynamic spraying head was designed and built, and its performance was optimized using the response surface method (RSM) with a central composite design. During the research process, the influence of the independent parameters such as the distance between the nozzle and the target, the angle of the target position, and the wind speed on the variables including spraying uniformity, the percentage of the spraying coverage, and the percentage of changes in the total spraying coefficient were discussed and investigated. The results of the research led to the determination of the 3.5 m s^{-1} wind speed, 2.5 m sprayer distance, and 90 degrees spraying angle with 0.792 desirability, which were considered as the optimal performance conditions of the electrodynamic spraying head. The results of laboratory validation for optimal conditions show that the uniformity of total spraying indicated by the total relative span factor (RSFT) and the percentage of spraying coverage (Cov) are equal to 1.65 and 28.27%, respectively.

Keywords: Electrodynamic head, Response surface method, Spraying angle, Sprayer, Uniformity coefficient, Wind speed

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ١٤، شماره ٢، تابستان ١٤٠٣، ص ١٦١-١٤٧

طراحی، ساخت و بهینه‌سازی عملکرد کلاهک پاشش الکترودینامیکی سم‌پاش پشتی موتوری ذره‌ای‌پاش

مریم رضائی[۱]، جلال خدائی[۲*]، بندر آستین چپ[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۸

چکیده

افت زیاد مواد شیمیایی، بادبردگی و نشست خارج از هدف سم‌پاش‌های متداول در ایران، مطالعه روی سم‌پاش‌های باردارکننده سم را ضروری می‌سازد. به‌همین منظور یک کلاهک الکترودینامیکی طراحی و ساخته شد. در این تحقیق از روش سطح پاسخ برای بهینه‌سازی عملکرد کلاهک پاشش الکترودینامیکی در سم‌پاش پشتی موتوری ذره‌ای‌پاش استفاده شده است. پارامترهای فاصله افشانک تا هدف (شامل سه سطح ۲، ۴ و ۶ متری)، زاویه قرارگیری هدف (شامل سه سطح صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه) و سرعت باد (شامل سه سطح ۲/۵، ۳ و ۳/۵ متر بر ثانیه) به‌عنوان پارامترهای مستقل و یکنواختی پاشش و درصد سطح پاشش به‌عنوان متغیرهای وابسته مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که مولفه‌های خطی زاویه پاشش و فاصله پاشش و هم‌چنین برهم‌کنش زاویه پاشش×فاصله پاشش و فاصله پاشش×سرعت باد، دارای تاثیر معنی‌داری بر تغییرات ضریب پاشش کل می‌باشند ($p<0.05$). بیش‌ترین ضریب یکنواختی پاشش کل برابر با ۱/۹۵ برای زاویه قرارگیری هدف صفر درجه، فاصله ۶ متری و سرعت ۳/۵ متر بر ثانیه و کم‌ترین مقدار این ضریب برابر با ۱/۱۸ برای زاویه قرارگیری هدف ۹۰ درجه، فاصله پاشش ۲ متر و سرعت باد ۲/۵ متر برثانیه به‌دست‌آمده است. مدل ریاضی ارائه‌شده برای پیش‌بینی تغییرات ضریب یکنواختی پاشش و درصد سطح پاشش از دقت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. ضریب یکنواختی پاشش با افزایش سرعت باد و فاصله پاشش افزایش یافته است ($p<0.01$). در محدوده فاصله پاشش ۲، ۴ و ۲ الی ۴ متری، با افزایش زاویه پاشش مقدار سطح پاشش به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است ($p<0.05$). شرایط بهینه برای عملکرد کلاهک الکترودینامیکی ساخته‌شده در سرعت هوای ۳/۵ متربرثانیه، فاصله پاشش ۲/۵۸ متر و زاویه پاشش ۹۰ درجه با مطلوبیت ۰/۷۹۲ به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: زاویه قرارگیری، سرعت باد، سطح پاسخ، سم‌پاش، ضریب یکنواختی، کلاهک الکترودینامیکی

مقدمه

با توجه به نیاز روزافزون به محصولات کشاورزی، محافظت از محصولات در مقابل عوامل بیماری‌زا و جلوگیری از اتلاف آن‌ها، دارای اهمیت به‌سزایی است. سم‌پاش‌های مرسوم در ایران دارای معایب زیادی نظیر بادبردگی و آلودگی محیط‌زیست، عدم پوشش کامل و یکنواخت سطح مورد سم‌پاشی، گیاه‌سوزی، ضایعات زیاد محصول و تلفات زیاد محلول سم هستند. بنابراین ارزیابی روش‌های نوین سم‌پاشی و به‌کارگیری انواع سم‌پاش‌های الکتریکی به‌عنوان جایگزین سم‌پاش‌های مرسوم امری ضروری است. نتیجه تحقیقات در سال‌های گذشته نشان داده است که اندازه و چگالی قطرات محلول سم و نحوه پخش آن‌ها روی اهداف بیولوژیک از نقطه نظر تاثیر آفت‌کش تا چه حد حائز اهمیت بوده و نقش به‌سزایی در تعیین کمیت و کیفیت عملیات مبارزه دارد (Cunha, Carvalho, & Marcal, 2012; Mishra, Singh, Sharma, Sharma, & Singh, 2014; Kumar Narang, Mishra, Kumar, Singh Thakur, & Singh, 2015).

در چند دهه اخیر پیشرفت‌هایی در زمینه طراحی، ساخت، کاربرد، بهینه‌سازی و روش ارزیابی سم‌پاش‌ها آغاز شده است. فن‌آوری‌های رباتیک و پاشش خودکار مانند سم‌پاش‌های نرخ متغیر، سم‌پاشی به کمک پهپاد، سم‌پاش‌های الکترواستاتیکی، سم‌پاشی به کمک فراگیری ماشین و ارزیابی سم‌پاش‌ها به کمک پردازش تصویر در حال رشد هستند تا میزان بهره‌وری از آفت‌کش‌ها، کاهش بقایای آفت‌کش‌ها بر روی گیاه، زمان واقعی، صرفه‌جویی در هزینه و قابلیت سازگاری بالا با حفاظت از گیاه را، افزایش دهند. این فن‌آوری‌ها در زیر چتر کشاورزی دقیق قرار می‌گیرند و نه‌تنها هزینه نیروی کارگری

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۳- دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: j.khodaei@uok.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2023.79865.1134

را کاهش می‌دهند بلکه در حفاظت از محیط‌زیست نیز بسیارموثر هستند (Ahmad, Khaliq, Qiu, & Sultan, 2021; Patel, 2016; Zhang, Lian, & Zhang, 2017; Indu Baghel, Bhardwaj, & Ibrahim, 2022; Mousavi & Baradaran Motie, 2021; Behzadi Pour, Ghasemi Nejad Raeeni, Asoodar, Marzban, & Abdanan Mehdizadeh, 2017; McNearney & Hons, 2020).

سمپاشی موفق، به پوشش کامل هدف، که به‌طور یکنواخت توزیع شده باشد، بستگی دارد (Cunha *et al.*, 2012). پاشش قطرات باردار سم ازجمله روش‌های موثری است که با بهره‌گیری از ویژگی‌های پتانسیل صفرگیاه، موجب شکل‌گیری میدان جاذبه الکتریکی میان ابرافشانه و سطح گیاه شده و منجر به افزایش جذب و نشست سم برروی هدف می‌شود (Farooq, Walker, Heintschel, & English, 2010; Yang *et al.*, 2015; Moltó *et al.*, 2017; Haji Agha Alizadeh, Pourvosoughi Gregari, & Bakhtiari, 2018). درافشانک‌های باردارکننده هرچند میزان بار قطرات سم کوچک می‌باشد، ولی نیروی الکتریکی که ذرات را به طرف گیاه می‌کشد، خیلی بزرگ‌تر از نیروی ثقل است، بدین‌معنی که هنگام رسیدن قطرات سم به اطراف گیاه، جهت حرکت آن‌ها برعکس شده و بر ضد نیروی ثقل به طرف بالا حرکت کرده و تشکیل کمربند الکتریکی[1] می‌دهند (Mostafaei Minagh, Ghobadian, & Jahannama, 2008). بنابراین، پاشش‌های باردارشده الکتریکی قابلیت انتقال قطرات بیشتر به سطح رویی و زیرین محصول را افزایش، میزان سم مصرفی را کاهش و در نهایت سبب بهبود عملکرد سمپاشی در مقایسه با سمپاش‌های رایج می‌گردد. علاوه براین یک کلاهک سمپاش الکتروستاتیکی نرخ جریان را تا ۳۱ درصد نسبت به نرخ متداول کاهش می‌دهد. قطرات ایجادشده به‌وسیله کلاهک الکتروستاتیکی تمایل بیشتری دارند که ازبین شاخ وبرگ اهداف به‌وسیله جریان هوای کمکی عبور کنند. ولی جذب قطرات روی هدف در سمپاشی الکتروستاتیکی کم دوام ومیزان پاشش روی هدف کم است. در این سیستم بار الکتریکی کافی به قطرات سم القا نشده و همین امر سبب پایین آمدن نشست قطرات سم بر روی هدف می‌گردد (Farooq *et al.*, 2010; Matthews, Bateman, & Miller, 2014).

بررسی تاثیر ترکیبی عواملی مانند نرخ جریان، اندازه قطره و جریان هوا نشان داده است که برای طیف‌های مختلفی از اندازه قطرات،کاهش نرخ جریان موجب چگالی کمتر ابر پاشش می‌شود. قطرات کوچک‌تر دریک ابرپاشش باغلظت کم تمایل بیشتری به بادبردگی دارند، درنتیجه نشست روی هدف کاهش می‌یابد (Farooq *et al.*, 2010)

بالابردن قابلیت اجرایی و بازده سیستم‌ها در فرآیند سمپاشی به‌دلیل خطرات زیست‌محیطی مصرف بالای آفت‌کش‌ها و کاهش هزینه‌های مصرفی، از اهمیت بالایی برخودار می‌باشد. روش‌های متعددی برای بهینه نمودن وتحلیل و مدل‌سازی یک فرآیند ارائه شده است که می‌توان در این میان به روش‌هایی همچون الگوریتم ژنتیک، تاگوچی، شبکه‌های عصبی مصنوعی، ضرایب لاگرانژ، نیوتن، سطح پاسخ و غیره اشاره نمود. روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای مدل‌کردن و تجزیه و تحلیل مسائلی که در آن متغیر پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر مستقل می‌باشد، بسیار مفید است. هدف از این تحلیل بهینه‌کردن متغیرهای پاسخ می‌باشد. روش سطح پاسخ کاربرد قابل‌توجهی در طرح‌ریزی، توسعه، فرموله کردن فرآیندها و همچنین ارتقای طراحی سیستم‌های موجود دارد. مدل ریاضی ارائه‌شده در این روش به توضیح فرآیند و تاثیر هرکدام از پارامترها و همچنین اثرات متقابل آن‌ها می‌پردازد (Witek-Krowiak, Chojnacka, Podstawczyk, Dawiec, & Pokomeda, 2014).

در تحقیقی نمونه اولیه‌ای از سمپاش باغی مبتنی بر فن‌آوری ماشین بینایی و ساخته‌شده براساس ساختار تاج درخت و میزان سبزینه مورد ارزیابی قرار گرفت و عملکرد سمپاش در باغ زیتون در دوحالت مختلف سمپاشی به‌صورت سراسرپاشی و سمپاشی منقطع هدف‌دار و همچنین در سه سرعت پیش‌روی ۲ و ۳/۵ و ۵ کیلومتر برساعت مقایسه گردید. نتایج نشان داد در کاربرد سمپاش طراحی‌شده جدید برای باغ زیتون، مصرف سم تقریباً ۵۴ درصد کاهش یافت و بهره‌وری بهبود یافت (Asaei, Jafari, & Loghavi, 2016).

در پژوهش دیگری محققان به مقایسه و ارزیابی فنی سمپاش‌های الکتروستاتیکی، میکرونر و پشت تراکتوری لانس‌دار در کنترل آفت کرم سیب پرداختند و نتایج نشان داد که یکنواختی قطرات در روی برگ‌ها در سمپاش‌های الکتروستاتیکی و میکرونر با ۳۰ قطره در سانتی‌متر مربع بهتر از نوع سمپاش لانس‌دار و در پشت برگ‌ها، سمپاش الکتروستاتیکی با تعداد ۱۶ قطره در سانتی‌متر مربع دارای پوشش مناسب‌تری بود. از نظر درصد کنترل آفت کرم سیب، بررسی تعداد نمونه‌های سیب سالم و آفت‌زده نشان داد که سمپاش لانس‌دار با میانگین ۱۸/۸درصد در مقایسه با دو روش دیگر دارای کم‌ترین اثربخشی در کنترل آفت کرم سیب بود (Amirshaghaghi & Safari, 2016).

هدف از این مطالعه طراحی و ساخت یک کلاهک الکترودینامیکی و بهینه‌سازی اثرات پارامترهای زاویه قرارگیری هدف، فاصله پاشش و سرعت وزش باد بر عملکرد کلاهک الکترودینامیکی در سمپاش پشتی موتوری ذره‌ای‌پاش به‌روش سطح پاسخ[2](RSM) می‌باشد.

1- Electrostatic "wrap-around"

2- Response Surface Methodology

مواد و روش‌ها

تجهیزات و شرایط آزمایش‌ها

سم‌پاش: برای انجام آزمایش‌ها از سم‌پاش پشتی موتوری ذره‌ای‌پاش SH.CO (مدل423، شرکت مهندسی صنعتی شاخص، ایران) منضم به کلاهک الکتروستاتیکی (ساخت شرکت احسان تحقیق وابسته به مرکز تحقیقات مهندسی جهاد کشاورزی آذربایجان شرقی) با حجم مخزن ۱۲ لیتر، حجم هوا برای افشانک ۶۸۰ متر مکعب در ساعت و سرعت خروج هوا ۱۰۰ متربرثانیه استفاده گردید. آزمایش‌ها در بهار و تابستان سال ۱۳۹۵ در کارگاه ماشین‌های کشاورزی گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان انجام شد.

کلاهک الکترودینامیکی: مدار الکتریکی با استفاده از نرم‌افزار طراحی مدارهای الکتریکی Proteus Professional 7.9 sp1 طراحی شد و کمترین مقاومت مورد نیاز برای کاهش جریان الکتریکی و خطر برق‌گرفتگی ۱/۱ مگااهم (با استفاده از سری کردن ۵ عدد مقاومت ۲۲۰ کیلواهمی) محاسبه شد (Halliday, Resnick, & Walker, 2010). همچنین یک خازن ۳ کیلوولت در سر راه ورودی الکترود و یک خازن ۶ کیلوولت هرکدام به ظرفیت ۱۰ نانوفاراد در سر راه خروجی الکترود در کلاهک الکتروستاتیکی قرار گرفت. از خازن‌ها در مدار برای صاف کردن سطح تغییرات ولتاژ مستقیم و در کلاهک الکترودینامیکی به‌عنوان فیلتر هم استفاده می‌شود. زیرا خازن‌ها به‌راحتی سیگنال‌های غیرمستقیم AC را عبور می‌دهند ولی مانع عبور سیگنال‌های مستقیم DC می‌شوند. در حالت جریان متناوب خازن‌ها برای کاهش جریان نیز به‌کار می‌روند. در واقع وقتی ولتاژ خازن‌ها حداکثر است جریان عبوری از آن‌ها صفر خواهد بود. در جریان متناوب خازن مدام شارژ و دشارژ می‌شود و با کاهش ولتاژ روی خازن جریان به حداکثر می‌رسد. این مدار الکتریکی جایگزین مدار الکتروستاتیکی گردید.

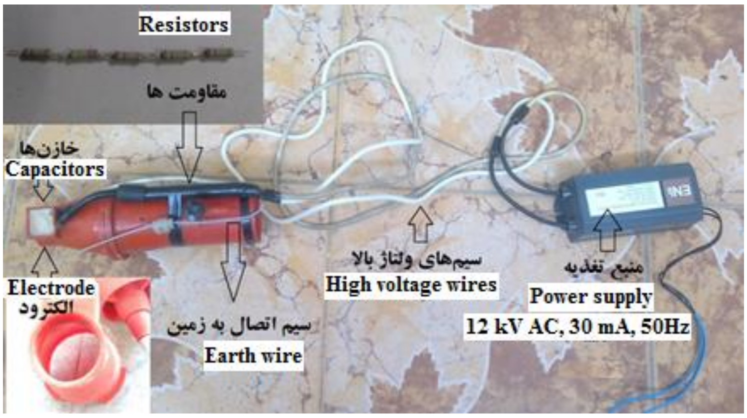
تصویر کلاهک الکترودینامیکی ساخته‌شده در این تحقیق در شکل (۱-a) و مدار الکتریکی مربوطه در شکل (۱-b) نشان داده شده است. در این حالت برای باردارکردن قطرات خروجی، از روش القایی با ولتاژ ۱۲ کیلوولت و جریان الکتریکی ۳۰ میلی‌آمپر استفاده شده است. خروجی مدار ولتاژ بالا به یک حلقه فلزی متصل شد. این حلقه در داخل شیاری واقع در بدنه پلاستیکی محاط بر افشانک و نزدیک به نوک آن قرار گرفته است. الکترود حلقوی عامل القای بار بر روی مایع می‌باشد (القاگر)، لذا باید در مجاورت مایع قرار گیرد. الکترود باید قبل از لحظه خردشدن مایع به قطرات، اثر خود را روی مایع گذاشته و بار الکتریکی را بر روی آن القا نماید. با توجه به این‌که مایع خود در پتانسیل زمین می‌باشد، بنابراین با قرار دادن الکترود حلقوی در مقابل نقطه خروج قطرات از افشانک، می‌توان بار الکتریکی را بر روی مایع، درست قبل از خردشدن، القا نمود. در این حالت قطرات قبل از خرد شدن، توسط الکترود باردار می‌شوند وسپس به ذرات باردار ریزی تبدیل می‌شوند. برای جلوگیری از خیس شدن حلقه از یک لایه بسیارنازک برای پوشاندن الکترود استفاده شد.

انجام آزمایش‌ها: برای ایجاد سطوح مختلف هوا از یک دمنده پره‌ای (پنکه)با قابلیت کنترل سرعت دمنده استفاده شد. پنکه در فاصله یک متر در پشت افشانک و در جهت سم‌پاشی قرار داده شد. سرعت هوا طی آزمایش‌ها توسط بادسنج پره‌ای (LutronAM-4206M, Taiwan) در فاصله یک متری جلو پنکه اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها با توجه به محدودیت زمانی در دو روز مختلف و در دمای هوای ۱۶ درجه سلسیوس برای آزمایش حالت الکتروستاتیکی و ۲۴ درجه سلسیوس برای آزمایش حالت الکترودینامیکی و رطوبت نسبی ۴۲/۲۰ درصد برای آزمایش الکتروستاتیکی و ۳۴ درصد برای آزمایش الکترودینامیکی انجام گرفت. اندازه‌گیری دما و رطوبت محیط با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج مدل HT-3009 صورت گرفت. از یک صفحه آلومینیومی با ابعاد ۷×۳ سانتی‌متر به‌عنوان هدف استفاده شد. صفحه مذکور در ارتفاع دو متری از سطح زمین بر روی یک پایه فلزی متصل به پتانسیل صفر زمین نصب شد. برای جلوگیری از تاثیر نیروهای الکتریکی بین قطرات و پایه فلزی، پایه توسط پلاستیک عایق کاملا پوشانیده شد. محل اتصال صفحه آلومینیمی به پایه فلزی لولا بوده تا به‌راحتی بتوان زاویه قرارگیری هدف با سم‌پاش را تغییر داد (شکل ۲).

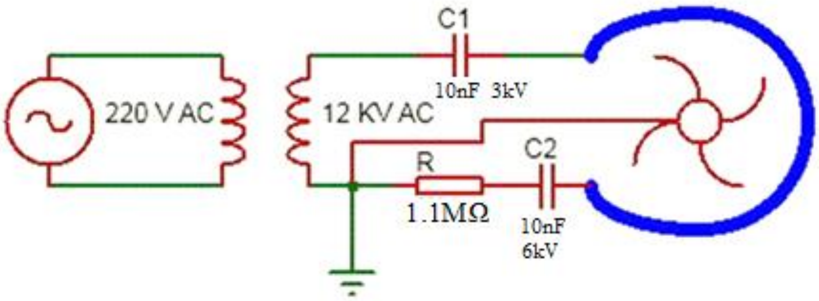
برای بررسی چگونگی نشست قطرات روی سطح جلویی و پشت هدف، کاغذهای حساس به آب (ساخت شرکت کشت‌پوش تهران، ایران) روی سطوح جلویی و پشتی صفحه آلومینیومی قرار داده شد. صفحه مذکور قابل چرخش بوده و در قسمت متحرک آن نقاله‌ای برای تنظیم زاویه کارت‌ها نصب شده است و به‌راحتی می‌توان زاویه قرارگیری کارت حساس به آب را نسبت به راستای جریان افشانک تغییر داد. تصویر دیجیتال کارت‌ها با استفاده ازاستریومیکروسکوپ مدل OlympusSZX12 با لنز شیای X1 با بزرگ‌نمایی ۷ برابر تهیه شد (شکل ۳).

در مجموع ۸۰ تصویر از کارت‌های حساس به آب تهیه شد: ۲۰ تصویر مربوط به آزمایش الکتروستاتیکی روی هدف،۲۰ تصویر مربوط به آزمایش الکتروستاتیکی پشت هدف،۲۰ تصویر مربوط به آزمایش الکترودینامیکی روی هدف و ۲۰ تصویر مربوط به آزمایش الکترودینامیکی پشت هدف، که در این‌جا تصاویر آزمایش الکترودینامیکی آورده شده است (شکل ۴).

مساحت پاشش، اندازه و تعداد قطرات به‌عنوان متغیرهای وابسته برای یک سانتی‌متر مربع از هر کدام از تصاویر بزرگ‌نمایی‌شده به کمک نرم افزارهای پردازش تصویر MountainsMap Trial (شرکت Digital Surf) و DepositScan اندازه‌گیری شد.



a



b

شکل ۱ – a– سامانه هدالکترودینامیکی، b– مدارالکتریکی سامانه

Fig.1. Electrodynamic spraying head system a) image and b) schematic circuit diagram

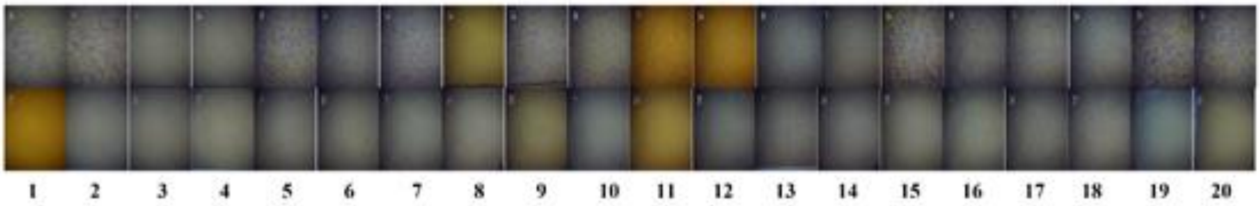


شکل ۲– پایه فلزی متصل به زمین

Fig.2. Metal stand with ground connection



شکل ۳- استریو میکروسکوپ مدل Olympus SZX12 با لنز شی‌ای X1 و بزرگ‌نمایی ۷ برابر
Fig.3. Olympus SZX12 stereo microscope with X1 objective lens and 7x magnification



شکل ٤- نتایج حاصل از آزمایش سم‌پاش الکترودینامیکی روی هدف (ردیف بالا) و پشت هدف (ردیف پایین)
Fig.4. Results of electrodynamic sprayer testing on the upper side of the target (top row) and underside of the target (bottom row)

یکنواختی پاشش

متداول‌ترین واژه‌ای که برای تشریح طیف اندازه قطره پاشیده‌شده در کشاورزی به‌کار می‌رود قطر میانه حجمی است ($D_{v0.5}$) که واحد آن میکرون است. دو پارامتر اختیاری دیگر که برای تشریح بیشتر توزیع از میانه استفاده می‌شوند، $D_{v0.1}$ و $D_{v0.9}$ هستند. این پارامترها نسبت حجم پاشش (به‌ترتیب ۱۰ و ۹۰ درصد) قطراتی با اندازه مورد نظر یا کوچک‌تر را شامل می‌شوند. $D_{v0.1}$ اغلب برای تخمین بخشی از پاشش که قابلیت بادبردگی را دارد به‌کار می‌رود. محدوده مورد نظر یک اندازه‌گیری عرض طیف قطره اطراف $D_{v0.5}$ است و ضریب یکنواختی (محدوده پاشش) RSF[1] با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Bayvel & Orzechowski, 1993; Hoffmann & Hewitt, 2005; Cunha *et al.*, 2012; Sayınci, Bastaban & Sánchez-Hermosilla; 2012; Ferguson *et al.*, 2015).

$$RSF = \frac{D_{v0.9} - D_{v0.1}}{D_{v0.5}} \quad (1)$$

از آن‌جایی که پاشش‌ها در هر دو سمت هدف از اهمیت یکسانی برخوردار هستند، ضریب یکنواختی پاشش کل (RSFT[2]) از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$RSFT = \frac{RSF_u + RSF_d}{2} \quad (2)$$

که در آن، RSF_u و RSF_d به‌ترتیب بیانگر ضریب یکنواختی پاشش سطح رویی و زیرین هدف می‌باشند.

طرح آزمایش‌ها

به‌منظور ارزیابی اثرات پارامترهای مستقل بر یکنواختی پاشش از روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی استفاده شد. فاصله افشانک تا هدف (شامل سه سطح ۲، ۴ و ۶ متری)، زاویه قرارگیری هدف (شامل سه سطح صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه) و سرعت باد (شامل سه سطح ۲/۵، ۳ و ۳/۵ متر بر ثانیه) (Mahmoudi, Heidarbeigi, & Azizpanah, 2019) به‌عنوان پارامترهای تاثیرگذار مستقل در جدول ۱ به‌فرم کدشده و کدنشده نشان داده شده‌اند. در روش سطح پاسخ دامنه انتخاب‌شده برای هر فاکتور اهمیت زیادی دارد. دامنه هر فاکتور باید کدبندی شده و در محدوده ۱- تا ۱ قرار گیرد، تا تحلیل رگرسیون

1- Relative diameter span factor

2- Total relative diameter span factor

به‌خوبی انجام پذیرد. در حالت مرکز وجهی حدود بیشینه و کمینه با کد سطح‌های (+۱) و (−۱) مشخص می‌شوند که تنها اطلاعاتی هستند که با توجه به مطالعات و ایده پژوهش، برای سطوح هر متغیر باید در اختیار نرم‌افزار آماری قرار گیرند. به این ترتیب سطوح دوم یا همان سطوح وسط، با توجه به سه سطح بودن آزمایش‌ها، به‌عنوان سطح صفر یا مرکزی (۰)، مقداری بین کمینه و بیشینه است.

درآزمایش‌های طراحی‌شده گاهی لازم است به‌طور همزمان چند پاسخ را بهینه‌سازی کرد. رویکرد معمول برای این کار بهره‌گیری از تابع مطلوبیت برای یافتن مقادیری از عوامل کنترلی است که بیش‌ترین مطلوبیت را ایجاد می‌کنند. این روش که اولین بار توسط هارینگتون (Harrington, 1965) ارایه گردید، برای بهینه‌سازی مستقل چندپاسخی، پرکاربردترین روش است. ایده این روش، بر ترکیب پاسخ‌ها در قالب یک مسئله تک‌پاسخی و بهینه نمودن تابع به‌دست آمده است (Derringer & Suich, 2018). در این روش مطلوبیت آماری بین صفر و یک تعریف شده که مقدار پایین آن بیان‌گر عدم نیل به هدف تعیین‌شده و سطح بالای آن بیان‌کننده نیل به هدف به‌طور کامل می‌باشد. وقتی هدف بهینه کردن چندین پاسخ به طور همزمان است، مطلوبیت هریک از پاسخ‌ها به‌صورت جداگانه مشخص شده و سپس از میانگین هندسی‌شان به‌عنوان معیار برآورده‌کننده هدف‌ها به‌صورت همزمان استفاده می‌شود. به‌منظور بهینه‌سازی پاسخ در این تحقیق از تابع مطلوبیت استفاده شد. در این حالت هر دو پاسخ سیستم (یکنواختی پاشش کل و درصد سطح پاشش) بایستی حداکثر و متغیرهای ورودی در محدوده آزمایش در نظر گرفته شوند.

جدول ۱– مقادیر متغیرهای مستقل و سطوح اختصاص‌داده‌شده به آن‌ها

Table 1- Values of independent variables and their levels

محدوده و سطوح (کدشده) **Bound and Levels (Coded)**			**نماد** **Symbol**		**پارامترهای مستقل** **Independent parameters**
-1	**0**	**1**	**کدشده** **Coded**	**کدنشده** **Uncoded**	
2	4	6	x_1	D	فاصله افشانک (متر) Nozzle distance (m)
0	45	90	x_2	β	زاویه قرارگیری (درجه) Angle of placement (deg)
2.5	3	3.5	x_3	u	سرعت باد (متر برثانیه) Wind speed (m s^{-1})

به‌منظوربررسی ارتباط بین متغیرهای مستقل با متغیرهای پاسخ از رابطه (۳) استفاده شد (Kathleen, Carley, Kamneva, & Reminga, 2004):

$$Y_i = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{3} \alpha_i x_i + \sum_{j=1}^{3}\sum_{i=1}^{3} \alpha_{ij}\, x_i x_j + \sum_{i=1}^{3} \alpha_j {x_i}^2 \qquad (۳)$$

که درآن، y_i پاسخ‌های پیش‌بینی‌شده، x_i متغیرهای کدشده متغیرهای طبیعی (مستقل)، i تعداد متغیرها، α_0 ثابت مدل، α_i ضرایب متغیرهای خطی و α_{ij} ضرایب اثرات متقابل دوگانه متغیرها می‌باشند.

جدول ۲ نشان‌دهنده ماتریس طرح مرکب مرکزی با ۲۰ واحد آزمایشی (با ۶ نقطه مرکزی) می‌باشد. برای کاهش مقدار خطا، هرکدام از آزمایش‌ها در سه تکرار انجام و مقدار میانگین به‌عنوان نتیجه بیان شد.

نتایج و بحث

مطابق با جدول ۲، حداکثر مقدار ضریب یکنواختی پاشش کل برابر با ۱/۹۵ برای زاویه پاشش صفر درجه، فاصله ۶ متری و سرعت ۳/۵ متر بر ثانیه به‌دست‌آمده است. این در حالی است که کم‌ترین مقدار ضریب یکنواختی پاشش برابر با ۱/۱۸ به‌ترتیب در شرایط آزمایش زاویه قرارگیری هدف ۹۰ درجه، فاصله پاشش ۲ متر و سرعت باد ۲/۵ متر برثانیه به‌دست‌آمده است. نتایج حاصل از تجزیه واریانس برازش رابطه (۳) بر داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی برای یکنواختی پاشش کل در جدول ۳ نشان داده شده است.

براساس آنالیز واریانس برای مدل برهم‌کنش دو فاکتور (مقدار P کمتر از ۰/۰۰۰۱، ضریب تبیین ۰/۹۳۸۳، ضریب تبیین مطلق ۰/۹۱۰، انحراف استاندارد ۰/۰۵۹۰ و ضریب تغییرات ۳/۷۹۰٪)، می‌توان بیان داشت که این مدل از دقت بالایی در پیش‌بینی مقادیر یکنواختی پاشش کل برخوردار می‌باشد. مطابق با این نتایج می‌توان بیان داشت که مولفه‌های خطی زاویه پاشش و فاصله پاشش و همچنین برهم‌کنش زاویه پاشش×فاصله پاشش و فاصله پاشش×سرعت هوا دارای تاثیر معنی‌داری بر روی میزان یکنواختی پاشش کل بوده است ($p<0.05$). با این وجود، مولفه خطی سرعت هوا و برهم‌کنش سرعت هوا×زاویه پاشش فاقد اثر معنی‌داری بر روی تغییرات ضریب یکنواختی پاشش کل بوده است.

جدول ۲- طرح مرکب مرکزی استفاده‌شده در آزمایش‌ها و مقادیر اندازه‌گیری‌شده پاسخ‌ها

Table 2- Central composite design used in the experiments and the resulting response

Run no.	β (degree)	D (m)	u ($m\ s^{-1}$)	Response (Y)				
				RSFT	Cov (%)	$Dv_{0.1}$ (μm)	$Dv_{0.5}$ (μm)	$Dv_{0.9}$ (μm)
1	0	2	2.50	1.52	21.88	162.62	408.43	782.10
2	90	2	2.50	1.18	27.98	225.34	466.85	777.74
3	0	6	2.50	1.70	7.08	116.24	269.97	574.86
4	90	6	2.50	1.83	7.18	98.00	268.73	588.50
5	0	2	3.50	1.33	19.58	223.14	411.54	769.36
6	90	2	3.50	1.25	30.68	185.90	493.39	804.00
7	0	6	3.50	1.95	6.78	91.80	250.50	580.08
8	90	6	3.50	1.81	6.88	80.56	246.41	525.76
9	0	4	3.00	1.62	22.73	148.45	325.42	676.60
10	90	4	3.00	1.52	26.33	147.45	347.10	674.00
11	45	2	3.00	1.32	25.93	199.25	442.46	783.30
12	45	6	3.00	1.82	7.13	96.65	258.60	567.30
13	45	4	2.50	1.56	21.93	150.55	340.78	680.80
14	45	4	3.50	1.58	21.13	145.35	331.09	669.80
15	45	4	3.00	1.55	24.19	147.95	342.64	680.10
16	45	4	3.00	1.61	23.72	147.95	337.31	674.80
17	45	4	3.00	1.57	23.01	147.95	334.39	672.20
18	45	4	3.00	1.50	23.78	147.95	352.10	676.10
19	45	4	3.00	1.59	24.01	147.95	344.52	675.30
20	45	4	3.00	1.51	23.19	147.95	341.40	673.01

با توجه به جدول تجزیه واریانس (مقادیر F-value) تاثیر فاصله پاشش بر ضریب یکنواختی پاشش به مراتب بیش‌تر از اثر زاویه پاشش می‌باشد. نمودار سطح پاسخ برای ضریب یکنواختی پاشش بر حسب متغیرهای ورودی در شکل ۵ نشان داده شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، می‌توان بیان داشت که ضریب یکنواختی پاشش با افزایش فاصله پاشش و کاهش زاویه پاشش، افزایش یافته است. دلیل آن می‌تواند این باشد که درفواصل کمتر، نشست قطرات پاشیده‌شده در سطح رویی و زیرین هدف بیش‌تراست و از تلاقی و به هم‌پیوستگی این قطرات، ذراتی با قطر میانه حجمی بالاتر تشکیل می‌شود. این نتیجه با یافته‌های پژوهش‌گرانی که بر روی سم‌پاش‌های الکتروستاتیکی تحقیق کرده‌اند مطابقت دارد (Sasaki *et al.*, 2012; Haji Agha Alizadeh *et al.*, 2018; Jahannama & Zhao, Castle, & Adamiak, 2008). البته (Salehi, 2011) الگوی جذب و نشست قطرات محلول سم دارای بارالکتریکی را مطالعه نموده و دریافتند که دگرگونی درمقدارفاصله بین افشانک و هدف، در عملکرد افشانک بی‌تاثیر است. اما به هرحال کاهش این فاصله علاوه بر تقویت نسبی توان باردارکردن قطرات توسط افشانک، باعث افزایش میزان القای بار الکتریکی خواهدشد. تغییرات ضریب یکنواختی پاشش کل را می‌توان این‌گونه بیان داشت (رابطه ۴):

$$RSFT = 1.659 - 0.00328\beta + 0.0313D + 5.69 \times 10^{-4}\beta \times D + 0.044D \times u \quad (۴)$$

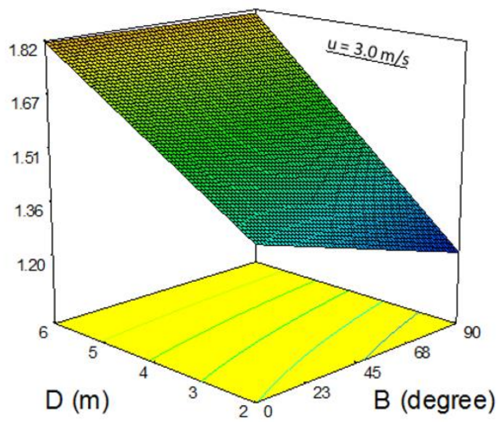
نتایج حاصل از برازش مدل ریاضی درجه دوم بر داده‌های آزمایش در جدول ۴ نشان داده شده است.

مقادیر R^2، $Adj\text{-}R^2$، CV و Press برای مدل انطباق داده‌شده بر داده‌های آزمایش، درصد پوشش سطح کاغذ حساس به آب به‌ترتیب برابر با ۰/۹۹۵۷، ۰/۹۹۱۹، ۳/۶۱٪ و ۸۰/۶۰ به‌دست آمده است. هم‌چنین مقدار عدم برازش برای مدل ریاضی ذکر شده معنی‌دار نشده است ($p<0.05$). این امر بیان‌گر دقت مناسب مدل در پیش‌بینی مقدار سطح پوشش کاغذ حساس به آب می‌باشد. مطابق این نتایج می‌توان بیان داشت که مولفه‌های خطی زاویه پاشش و فاصله پاشش، مولفه برهم‌کنش زاویه پاشش ×فاصله پاشش و توان دوم مولفه‌های فاصله پاشش و سرعت هوا بر روی مقدار پوشش سطح سم‌پاشی دارای تاثیر معنی‌داری می‌باشند. همچنین مولفه خطی سرعت باد، اثر متقابل سرعت باد×زاویه قرار گیری هدف، اثر متقابل سرعت باد×فاصله افشانک و مولفه توان دوم زوابه قرار گیری هدف فاقد تاثیر معنی‌داری بر درصد پوشش می‌باشند ($p>0.05$). از میان سه متغیر ورودی، فاصله پاشش دارای بیش‌ترین تاثیر بر روی مقدار سطح پوشش کاغذ حساس به آب می‌باشد. در سطوح بالای زاویه پاشش به‌خصوص در زاویه پاشش ۹۰ درجه، با افزایش فاصله از ۲ تا ۴ متر، ضریب یکنواختی پاشش از ۱/۱۸ در سرعت باد ۲/۵ متر بر ثانیه به ۱/۸۴ در سرعت باد ۳/۵ متر بر ثانیه افزایش یافته است (شکل ۵).

جدول ۳- نتایج حاصل از برازش مدل ریاضی بر داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها برای ضریب یکنواختی پاشش کل

Table 3- The results of mathematical model fitting on derived data from experiments for uniformity coefficient of total spraying

منبع تغییرات **Source of Variations**	درجه آزادی **(df)**	میانگین مربعات **Mean squares (MS)**	مقدار-F **F-Value**	مقدار احتمال **P-Value**
مدل Model	6	0.120	32.97	< 0.0001
زاویه قرارگیری هدف β	1	0.028	7.98	0.0143
فاصله افشانک تا هدف D	1	0.630	179.01	< 0.0001
سرعت باد u	1	0.0017	0.48	0.5005
اثر متقابل β×D (Interaction)	1	0.019	5.97	0.0296
اثر متقابل β×u (Interaction)	1	0.00001	0.004	0.9534
اثر متقابل D×u (Interaction)	1	0.015	4.35	0.0573
باقیمانده Residual	13	0.003		
عدم برازش Lack of Fit	8	0.005	2.37	0.1785
خطای خالص Pure Error	5	0.002		
Cor Total	19			
ضریب تعیین R^2	0.9383			
ضریب تعیین تعدیل‌شده Adj R^2	0.9100			
انحراف معیار Std. Dev.	0.0590			
ضریب تغییرات٪ C.V. %	3.790			
مجموع مربعات خطای پیش‌بینی PRESS	0.480			



شکل ۵- نمودار سطح پاسخ برای تغییرات ضریب یکنواختی پاشش کل بر حسب پارامترهای مستقل در سرعت هوای ۳ متر بر ثانیه

Fig.5. Response surface graph for uniformity coefficient variations of total spraying based on independent parameters at 3 m s^{-1} wind speed

جدول ٤- نتایج حاصل از برازش مدل ریاضی درجه دوم بر داده‌های درصد پوشش کاغذ حساس به آب

Table 4- The results of quadratic mathematical model fitting on derived data from water sensitive paper coverage percentage

منبع تغییرات **Source of Variations**	درجه آزادی **(df)**	میانگین مربعات **Mean squares (MS)**	مقدار-F **F-Value**	مقدار احتمال **P-Value**
مدل Model	9	131.96	259.04	< 0.0001
زاویه قرارگیری هدف B	1	44.10	86.69	0.0001
فاصله افشانک تا هدف D	1	828.10	1627.79	< 0.0001
سرعت باد U	1	0.10	0.20	0.6669
اثر متقابل β×D (Interaction)	1	36.13	71.01	< 0.0001
اثر متقابل β×u (Interaction)	1	3.13	6.14	0.0326
اثر متقابل D×u (Interaction)	1	0.13	0.25	0.6308
β^2	1	3.57	7.03	0.0243
D^2	1	129.41	254.39	< 0.0001
u^2	1	9.51	18.70	0.0015
باقیمانده Residual	10	0.51		
عدم برازش Lack of Fit	5	0.80	3.78	0.0854
خطای خالص Pure Error	5	0.21		
Cor Total	19			
ضریب تعیین R^2	0.9957			
ضریب تعیین تعدیل‌شده Adj R^2	0.9919			
انحراف معیار Std. Dev.	0.710			
ضریب تغییرات٪ C.V. %	3.61			
مجموع مربعات خطای پیش‌بینی PRESS	80.60			

به‌طور کلی افزایش فاصله افشانک تا هدف منجر به کاهش میزان پوشش سطحی روی هدف خواهدشد. علت این امر، افت شدت میدان الکترودینامیکی و تضعیف القای الکترودینامیکی و افت بیش‌تر بار دراثر افزایش فاصله افشانک و هدف است (Sasaki *et al.*, 2012; Haji Agha Alizadeh *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2008). این در حالی است که در سطوح پایین زاویه پاشش (برای مثال زاویه صفر درجه)، در ابتدا با افزایش فاصله پاشش از ۲ تا ۳متر، مقدار پاشش افزایش یافته و بعد از آن با شیب تندی کاهش می‌یابد.

در سمپاشی الکترودینامیکی یکنواختی نشست ذرات در سطح زیرین هدف، نسبتاً مشابه بوده که دلیل آن را می‌توان به تاثیر کمربند الکتریکی تشکیل‌شده در پیرامون هدف ربط داد که هم‌سو با یافته‌های (Sasaki *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2008) می‌باشد.

مطابق با کانتورهای تغییرات سطح پاشش (شکل‌های ۶ و ۷) می‌توان بیان داشت برای تمام سطوح سرعت هوا، در محدوده فاصله پاشش ۴ تا ۶ متر با افزایش زاویه پاشش، تغییری در مقدار سطح پاشش مشاهده نشده است ($p>0.05$). این در حالی است که در محدوده فاصله پاشش ۲ الی ۴ متر، با افزایش زاویه پاشش مقدار سطح پاشش به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است ($p<0.05$).

خلاصه‌ای از نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر و مقایسه آن‌ها با نتایج به‌دست‌آمده توسط سایر پژوهشگران در جدول ۵ نشان داده شده است.

براساس نتایج به‌دست‌آمده شاخص یکنواختی پاشش هرچه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد پاشش یکنواخت‌تر خواهد بود و اگر این نسبت بیش‌تر از ۴/۲ باشد، کیفیت پایین سم‌پاشی را نشان می‌دهد. هم‌چنین مقدار میانگین نشست قطرات در سانتی‌مترمربع روی هدف، با استفاده از سم‌پاش الکترودینامیکی بیش‌تر از الکتروستاتیکی است. با توجه به این‌که بادبردگی سم‌پاش الکترودینامیکی کم‌تر از الکتروستاتیکی محاسبه شد؛ لذا، نشست قطره روی هدف نیز برای این سم‌پاش بیش‌تر خواهد بود، در نتیجه از تلفات مواد شیمیایی و آلودگی محیط‌زیست کاسته می‌شود. اضافه می‌نماید که برای سم‌پاش الکترودینامیکی توزیع اندازه قطره بهتری گزارش شد، به این معنا که تفاوت اندازه قطرات در این سم‌پاش کم‌تر است، در نتیجه بادبردگی کم‌تر و پوشش بهتری خواهد داشت.

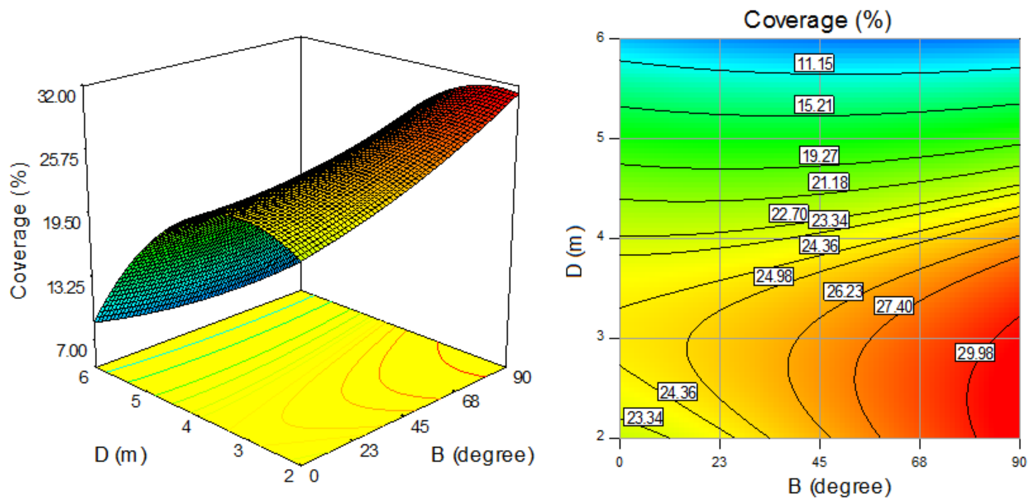
بهینه‌سازی و اعتبارسنجی

نتایج به‌دست‌آمده از فرایند بهینه‌سازی و اعتبارسنجی در جدول ۶ نشان داده شده است. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، شرایط حالت بهینه برای کلاهک الکترودینامیکی ساخته‌شده برابر خواهد بود با زاویه پاشش ۹۰ درجه، فاصله پاشش ۲/۵ متر و سرعت هوا ۳/۵ متربرثانیه با مطلوبیت ۰/۷۹۲. مقدار یکنواختی پاشش کل و درصد سطح پاشش در حالت عملکرد بهینه به‌ترتیب برابر با ۱/۶۸ و ۲۹/۵۳٪ می‌باشند. نتایج حاصل از اعتبارسنجی آزمایشگاهی برای شرایط بهینه نشان داد که مقدار یکنواختی پاشش کل و درصد سطح پاشش به‌ترتیب برابر با ۱/۶۵ و۲۸/۲۷٪ می‌باشد.

نتیجه‌گیری

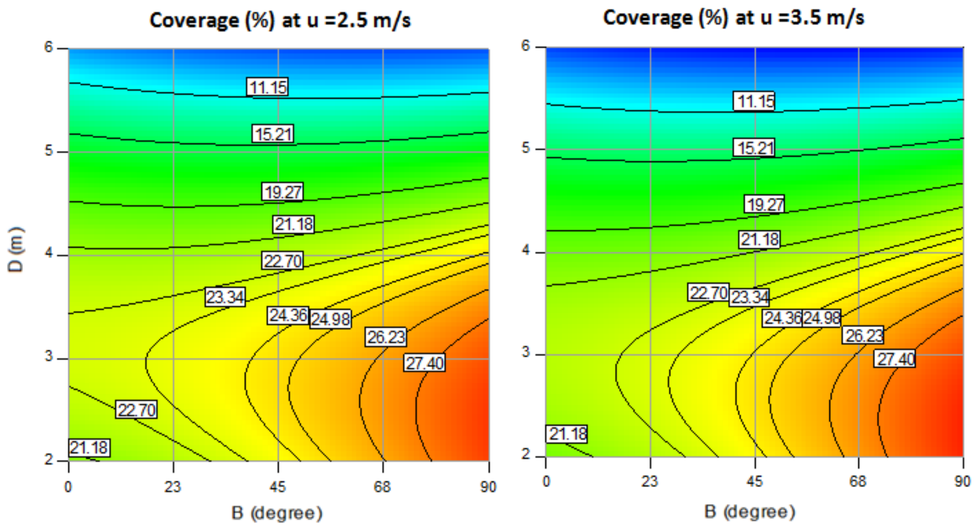
به‌منظور بهبود عملکرد سم‌پاش پشتی موتوری ذره‌ای‌پاش، کلاهک پاشش الکترودینامیکی طراحی و ساخته شد و با استفاده از طرح مرکب مرکزی روش سطح پاسخ عملکرد آن بهینه‌سازی شد. در طی فرآیند تحقیق، تاثیر پارامترهای مستقل فاصله افشانک تا هدف، زاویه استقرار هدف و سرعت باد بر روی متغیرهای یکنواختی پاشش، درصد سطح پاشش و نیز درصد تغییرات ضریب پاشش کل مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان داد که ضریب یکنواختی پاشش با افزایش فاصله پاشش و کاهش زاویه پاشش، افزایش یافته است. به‌طور کلی به علت به‌هم‌پیوستگی کم‌تر قطرات ریز، قطر میانه حجمی قطرات نشست کرده روی سطح زیرین هدف، نسبت به سطح رویی هدف دارای مقادیر بسیار کم‌تر بوده که اثرات مثبتی ازجمله کم شدن میزان محلول مصرفی خواهد داشت. به دلیل احتمال برخورد قطرات کوچک با یکدیگر در سطح رویی و تشکیل قطرات بزرگ‌تر و هم‌چنین نابسامانی در نشست قطرات، میزان یکنواختی نشست کمتر است.

براساس نتایج به‌دست‌آمده پارامترهای زاویه پاشش و فاصله پاشش و هم‌چنین برهم‌کنش زاویه پاشش×فاصله پاشش و فاصله پاشش×سرعت هوا دارای تاثیر معنی‌داری بر روی میزان یکنواختی پاشش کل بوده است ($p<0.05$)؛ ولی سرعت هوا و برهم‌کنش سرعت هوا×زاویه پاشش فاقد اثر معنی‌داری بر روی تغییرات ضریب یکنواختی پاشش کل بودند.



شکل ٦– نمودار سطح پاسخ و کانتورهای تغییرات درصد سطح پاشش کل بر حسب پارامترهای مستقل در سرعت هوای ۳ متر بر ثانیه

Fig.6. Response surface graph and contour of total spraying coverage percentage based on the independent parameters at 3ms^{-1} wind speed



شکل ۷- کانتورهای سطح پاسخ تغییرات درصد پاشش کل بر حسب پارامترهای مستقل در سطوح سرعت هوای ۲/۵ و ۳/۵ متر بر ثانیه

Fig.7. Response surface contour of total spraying percentage based on the independent parameters at 2.5 and 3.5 ms^{-1} wind speeds

جدول ۵- خلاصه‌ای از نتایج تحقیق حاضر و مقایسه آن‌ها با نتایج به‌دست‌آمده توسط سایر پژوهشگران

Table 5- Summary of the results of the current research in comparison with the results obtained by other researchers

نتایج تحقیق دیگران در سم پاش‌های الکتروستاتیکی **The results of other researchers on electrostatic sprayers**	سم‌پاش پشتی موتوری ذره‌ای‌پاش الکتروستاتیکی مدل SH.CO (تحقیق حاضر) **Electrostatic atomizer motorized knapsack sprayer SH-CO (Current research)**	سم‌پاش الکترودینامیکی (تحقیق حاضر) **Electrodynamic sprayer (Current research)**	محل اندازه‌گیری **Location of measurement**	پارامتر **Parameter**
87.5 (Mozafari, 2010)	83.45	99.55	روی هدف on target	مقدار میانگین قطر میانه عددی (NMD) The average value of the numerical median diameter (NMD) (µm)
78.5 (Mozafari, 2010)	78	77.6	پشت هدف underside of the target	
3.58 (Kumar Narang *et al.*, 2015)	3.61	3.31	روی هدف on target	مقدار میانگین ضریب یکنواختی پاشش VMD/NMD * The average value of the uniformity coefficient of spraying VMD/NMD
3.73 (Kumar Narang *et al.*, 2015)	3.93	3.95	پشت هدف underside of the target	
173-364 (Kumar Narang *et al.*, 2015)	291	332	روی هدف on target	مقدار میانگین نشست قطرات در هر سانتی‌متر مربع (برحسب تعداد قطرات) The average droplet deposition per square centimeter (in terms of the number of droplets)
38-65 (Mostafaei Minagh *et al.*, 2008)	64	55	پشت هدف underside of the target	
1.6 (Mishra *et al.*, 2014)	1.72	1.57	روی هدف on target	مقدار میانگین فاکتور توزیع اندازه قطره The average value of the relative diameter span factor (RSF)

* یکنواختی پاشش برای سم‌پاش الکترودینامیکی اندکی بیش‌تر از سم‌پاش الکتروستاتیکی بود.

* The spray uniformity of the electrodynamic sprayer was slightly higher than the electrostatic sprayer.

جدول ٦- نتایج حاصل از بهینه‌سازی و اعتبارسنجی

Table 6- The results of optimization and validation

نقطه بهینه به‌دست‌آمده The obtained optimal point			نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار The results obtained from the software		مطلوبیت تابع Desirability function	نتایج به‌دست‌آمده از اعتبارسنجی Validation results	
D (m)	β (deg)	u (m s^{-1})	RSFT	Cov (%)		RSFT	Cov (%)
2.5	90	3.5	1.68	29.53	0.792	1.65	28.27

تاثیر فاصله پاشش بر ضریب یکنواختی پاشش به مراتب بیش‌تر از اثر زاویه پاشش بود. در زاویه پاشش ۹۰ درجه، با افزایش فاصله از ۲ تا ۴ متر، ضریب یکنواختی پاشش از ۱/۱۸ در سرعت باد ۲/۵ متر بر ثانیه به ۱/۸۴ در سرعت باد ۳/۵ متر بر ثانیه افزایش یافته است. افزایش فاصله افشانک تا هدف، میزان پوشش سطحی روی هدف را کاهش داد. یکنواختی نشست ذرات در سطح زیرین هدف، در سمپاشی الکترودینامیکی نسبتاً یکسان بود.

برای تمام سطوح سرعت هوا، در محدوده فاصله پاشش ۴ تا ۶ متر با افزایش زاویه پاشش، تغییری در مقدار سطح پاشش مشاهده نشد و این در حالی است که در محدوده فاصله پاشش ۲ الی ۴ متر، با افزایش زاویه پاشش مقدار سطح پاشش به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است ($p<0.05$).

نتایج تحقیق منجر به تعیین سرعت ۳/۵ متربرثانیه باد، فاصله ۲/۵ متر افشانک و زاویه پاشش ۹۰ درجه با مطلوبیت ۰/۷۹۲ به‌عنوان شرایط بهینه عملکرد کلاهک الکترودینامیکی سم‌پاش مورد نظر گردید.

References

1. Ahmad, F., Khaliq, A., Qiu, B., & Sultan, M. (2021). *Advancements of spraying technology in agriculture*. In book: Technology in Agriculture (pp.19). Publisher: IntechOpen Limited, London, UK. https://doi.org/10.5772/intechopen.98500
2. Amirshaghaghi, F., & Safari, M. (2016). Comparison and technical evaluation of electrostatic, micronair and tractor mounted lance sprayers in order to control (*Carpocasa pomonella* L.) in apple orchards. *Journal of Agricultural Machinery*, *6*(2), 376-383. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.v6i2.36084
3. Asaei, H., Jafari, A., & Loghavi, M. (2016). Development and evaluation of a targeted orchard sprayer using machine vision technology. *Journal of Agricultural Machinery*, *6*(2), 362-375. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.v6i2.37220
4. Bayvel, L. P., & Orzechowski, Z. (1993). *Liquid atomization*. Taylor & Francis, Washington, DC.462P.
5. Behzadi Pour, F., Ghasemi Nejad Raeeni, M., Asoodar, M. A., Marzban, A., & Abdanan Mehdizadeh, S. (2017). Study of the operational parameters of crops turbine sprayer (turbo liner) on spray quality and diameter of droplets, using image processing. *Journal of Agricultural Machinery*, *7*(1), 61-72. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.v7i1.48194
6. Cunha, M., Carvalho, C., & Marcal, A. R. S. (2012). Assessing the ability of image processing software to analysis spray quality on water-sensitive papers used as artificial targets. *Biosystems Engineering*, *3*(1), 11-23. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.10.002
7. Derringer, G., & Suich, R. (1980) (Published online: 22 Feb 2018). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, *12*(4), 214-219. https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968 (accessed 30-01, 2023).
8. Farooq, M., Walker, T. W., Heintschel, B. P., & English, T. (2010). Impact of electrostatic and conventional sprayers characteristics on dispersion of barrier spray. *Journal of the American Mosquito Control Association*, *26*(4), 422-429. https://doi.org/10.2987/09-5891.1
9. Ferguson, J. C., O'Donnell, Ch. C., Chauhan, B. S., Adkins, S. W., Kruger, G. R., Wang, R., Ferreira, P. H. U., & Hewitt, A. J. (2015). Determining the uniformity and consistency of droplet size across spray drift reducing nozzles in a wind tunnel. *Crop Protection*, *76*, 1-6. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.06.008
10. Haji Agha Alizadeh, H., Pourvosoughi Gregari, H., & Bakhtiari, A. A. (2018). Evaluation of the functional factors of electrostatic spraying on the top and back surfaces of leaves, using image processing. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, *47*(1), 39-49. https://doi.org/10.22059/ijbse.2016.58476
11. Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2010). *Fundamentals of Physics*, 9th Edition, Wiley. 1136P.
12. Hoffmann, W. C., & Hewitt, A. J. (2005). Comparison of three imaging systems for water sensitive papers. *American Society of Agricultural Engineers*, *21*(6), 961-964. https://doi.org/10.13031/2013.20026
13. Harrington, E. C. (1965). The Desirability Function. *Industrial Quality Control*, *21*, 494-498.
14. Indu Baghel, A. S., Bhardwaj, A., & Ibrahim, W. (2022). Optimization of pesticides spray on crops in agriculture

using machine learning. *Computational Intelligence and Neuroscience*, Article ID 9408535, 10 pages. https://doi.org/10.1155/2022/9408535
15. Jahannama, M. R., & Salehi, H. (2011). Patterns of spray attraction and deposition due to electrical charging. *Sharif Mechanical Engineering Journal*, *3-27*(1), 3-14. (in Persian with English abstract).
16. Kathleen, M., Carley, N., Kamneva, Y., & Reminga, J. (2004). *Response surface methodology. CASOS*. Technical Report. CMU-ISRI-04, 136P.
17. Kumar Narang, M., Mishra, A., Kumar, V., Singh Thakur, S., & Singh, M. (2015). Comparative evaluation of spraying technology in cotton belt of Punjab (India). *Journal of Agricultural Engineering*, *1*, 61-71.
18. Matthews, G., Bateman, A., & Miller, P. (2014). *Pesticide Application Methods*, 4th Edition. John Wiley and Sons, Ltd. 536 P.
19. Mahmoudi, F., Heidarbeigi, K., & Azizpanah, A. (2019). Evaluation of the effect of pressure and wind speed on the amount of drift through the image processing method. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, *50*, 213-221. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/ijbse.2018.262469.665076
20. Mozafari, M. (2010). *Technical and economic investigation and comparison of the performance of sprayers with different mechanisms and their effect on onion thrips control*. Agricultural Engineering Research Institute, Karaj, Iran. 46P. (In Persian).
21. McNearney, E. J., & Hons, B. E. (2020). *Analysis of droplet-target interactions in electrostatically charged spraying systems*. A Thesis of Master of Engineering, in Electrical and Electronic Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. 94 P.
22. Mishra, P. K., Singh, M., Sharma, A., Sharma, K., & Singh, B. (2014). Studies on effect of electrostatic spraying in orchards. *Agricultural Engineering International, CIGR Journal*, *16*(3), 60-69.
23. Mostafaei Minagh, B., Ghobadian, B., & Jahannama, M. R. (2008). Design and development of a greenhouse electrostatic sprayer and evaluation. *Journal of Agricultural Science*, *18*(1), 229-242. (in Persian with English abstract).
24. Mousavi, A. M., & Baradaran Motie, J. (2021). *Design of an electrostatic attachment set for use in drone sprayers*. 13th National Congress on Biosystems Engineering and Agricultural Mechanization, Tehran, Iran.
25. Patel, M. K. (2016). Technological improvements in electrostatic spraying and its impact to agriculture during the last decade and future research perspectives– A review. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, *9*(1), 92-100. https://doi.org/10.1016/j.eaef.2015.09.006
26. Moltó, E., Chueca, P., Garcerá, C., Balsari, P., Gil, E., & van de Zande, J. C. (2017). Engineering approaches for reducing spray drift. *Biosystems Engineering*, *154*, 1-2. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.01.002
27. Sasaki, S. R., Teixeira, M. M., Fernandes, H. C., Monterio, P. M. B., Rodrigues, D. E., & Alvarenga, C. B. (2012). *Effect of space on droplets electrical charge during electrostatic spraying*. International Conference of Agricultural Engineering- CIGR-AgEng: agriculture and engineering for a healthier life, Valencia, Spain, 8-12 July 2012.
28. Sayınci, B., Bastaban, S., & Sánchez-Hermosilla, J. (2012). Determination of optimal spot roundness variation interval for droplet size analysis on water sensitive paper. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *14*, 285-298. https://dorl.net/dor/20.1001.1.16807073.2012.14.2.11.3
29. Witek-Krowiak, A., Chojnacka, K., Podstawczyk, D., Dawiec, A., & Pokomeda, K. (2014). Application of response surface methodology and artificial neural network methods in modeling and optimization of biosorption process. *Bioresource Technology*, *160*, 150-160. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.021
30. Yang, Z., Niu, M., Li, J., Xu, X., Xu, J., & Chen, Z. (2015). Design and experiment of an electrostatic sprayer with online mixing system for orchard. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, *31*, 60-67. https://doi/org/10.11975/j.issn.1002-6819.2015.21.008
31. Zhang, Y. L., Lian, Q., & Zhang, W. (2017). Design and test of a six-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) electrostatic spraying system for crop protection. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, *10*, 68-76. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20171006.3460
32. Zhao, S., Castle, G. S. P., & Adamiak, K. (2008). Factors affecting deposition in electrostatic pesticide spraying. *Journal of Electrostatics*, *66*(11-12), 594-601. https://doi.org/10.1016/j.elstat.2008.06.009